

MODÉLISATION DE SYSTÈMES CVCA À L'AIDE DU LOGICIEL ENERGYPLUS

Bellemare René, Kajl Stanislaw, Roberge Marc-Antoine

École de Technologie Supérieure, 1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal H1C 1K3, Canada.

(514) 396-8517, fax. (514) 396-8530, courriel : skajl@mec.etsmtl.ca

Dupras Ledoux ingénieurs, 8790, avenue du Parc, Montréal H2N 1Y6, Canada.

(514) 381-9205, fax. (514) 381-1350, courriel : rbellemare@dupras.com

RÉSUMÉ

L'article démontre les capacités de modélisation d'un système de traitement de l'air d'un bâtiment à l'aide du logiciel EnergyPlus v.1 build23. Pour ce faire, une partie du bâtiment abritant l'École de Technologie Supérieure (ÉTS) a servi de modèle. Un des onze systèmes VAV et les zones qu'il dessert ont été simulés à l'aide des logiciels EnergyPlus v.1 build23 et DOE-2E. Il s'agit de 54 zones internes formées principalement de salles de cours et de laboratoires informatiques. La première partie de l'article présente la validation dudit système modélisé dans le logiciel EnergyPlus à l'aide d'une base de données enregistrées sur 4 zones internes et sur le système CVCA qui les alimente. Parmi les paramètres enregistrés et comparés, on retrouve la température d'alimentation, le débit d'air soufflé et la température des 4 zones mentionnées précédemment. Les résultats de cette analyse comparative permettent d'affirmer qu'il est possible, à partir d'un relevé détaillé des zones d'un bâtiment, de simuler avec précision l'opération des systèmes CVCA et les zones qu'il dessert.

On démontre également dans cet article l'analyse comparative entre les résultats de simulation obtenus à partir d'un logiciel de référence (DOE-2E) et d'EnergyPlus v.1 build23. On y compare la température ambiante des zones, le débit d'air soufflé dans celles-ci et certains paramètres de fonctionnement du système CVCA. Les résultats de cette deuxième analyse permettent de remarquer de légères différences entre les résultats des deux logiciels.

Finalement, on y commente les particularités et les observations faites lors de la programmation et de l'analyse des résultats. Par exemple, le transfert d'air entre deux zones, l'outil de visualisation des parois introduites dans EnergyPlus, le convertisseur de fichiers météorologiques et le convertisseur de code DOE-2 ont été testés avec succès. Certaines anomalies détectées lors de l'analyse des résultats sont également présentées dans cette section.

INTRODUCTION

Au cours de la dernière décennie, un nombre important de logiciels de simulation des bâtiments a vu le jour. La précision de ces logiciels peut varier en fonction de la méthode de calculs et des hypothèses simplificatrices utilisées. En avril 2001, un nouveau logiciel est venu s'ajouter à la liste des logiciels les plus performants, tels DOE-2E et Blast. Contrairement à ses prédécesseurs, ce nouveau logiciel, nommé EnergyPlus version 1.0.0.023, permet de simuler toutes sortes d'arrangements de systèmes mécaniques du bâtiment. Il devenait donc intéressant de tester les capacités de ce dernier en créant un projet d'étude. Ce projet comporte les étapes suivantes :

1. L'analyse comparative du logiciel EnergyPlus.
2. Le développement d'un module de simulation.
3. La validation ainsi que l'intégration du module de simulation dans EnergyPlus.

Dans cet article, seule la première étape de ce projet d'étude est présentée. Après avoir démontré la méthodologie utilisée dans le projet, on présente l'application du logiciel EnergyPlus pour modéliser un système CVCA d'un bâtiment existant. Par la suite, les résultats de deux comparaisons y sont présentés. La première comparaison est réalisée pour valider le modèle. On y compare les résultats obtenus par le logiciel EnergyPlus avec les données enregistrées sur le système CVCA simulé. Dans le but d'éprouver le logiciel davantage, la deuxième comparaison consiste à confronter les résultats obtenus par le logiciel EnergyPlus à ceux obtenus à l'aide du logiciel DOE-2 considéré comme le logiciel de référence. Pour finir, on y présente un résumé des principales remarques et observations rapportées lors de la modélisation.

MÉTHODOLOGIE

La méthodologie utilisée pour effectuer l'analyse du logiciel EnergyPlus peut être résumée de la façon suivante :

1. Choisir un système CVCA dont le fonctionnement et les caractéristiques mécaniques sont connus et précis;

2. Enregistrer les paramètres d'états et de fonctionnement (température, débit, etc.) de certaines zones sélectionnées et du système CVCA pour une période d'un mois;
3. Modéliser le plus précisément possible à l'aide d'EnergyPlus le système sélectionné et les zones qu'il alimente;
4. Valider les résultats de la simulation avec les données enregistrées;
5. Modéliser le système et les zones qu'il dessert à l'aide du logiciel DOE-2E;
6. Ajuster les deux modèles de simulation de façon à simuler l'opération du système de façon identique dans les deux cas;
7. Comparer les résultats des simulations effectuées à l'aide des deux logiciels;
8. Décrire les éléments positifs et les lacunes du logiciel EnergyPlus rencontrés lors de la modélisation et de l'analyse des résultats.

MODÉLISATION

Le bâtiment étudié abrite l'École de Technologie Supérieure (ÉTS). L'édifice est équipé de 11 systèmes de traitement de l'air (CVCA) à volume d'air et température d'alimentation variables. Ils sont alimentés en eau chaude par le biais de la centrale de vapeur de la communauté urbaine de Montréal et en eau froide par le biais d'un groupe refroidisseur centrifuge. Pour limiter la quantité de données à saisir, un (1) système sur 11 a été programmé et simulé soit le système UTA-6. Ce système alimente 54 zones internes du 2^{ème} étage de l'édifice. Ces dernières sont principalement composées de salles de cours et de laboratoires informatiques et pratiques.

Lors de la saisie des données dans le logiciel EnergyPlus, le zonage utilisé a été calqué sur le zonage existant du bâtiment. Une zone est définie comme une pièce ou un groupe de pièces desservies par une même boîte à volume d'air variable (VAV). Tel que mentionné ci-dessus, le système CVCA alimentait 54 zones thermiques tandis que le logiciel EnergyPlus permet de connecter un maximum de 50 zones sur un même système CVCA (le nombre maximum de zones est limité par les éléments « Zone Mixer » et « Zone Splitter »). Ainsi, toutes les zones corridors ont été regroupées en une seule zone thermique. Les débits maximum et minimum d'alimentation de chaque zone ont été fixés à partir du rapport d'état des boîtes à volume d'air variable fourni par le gestionnaire du bâtiment. La figure 1 présente le schéma de l'installation du système UTA-6 incluant le nom des différents nœuds modélisés dans EnergyPlus. Des équipements similaires ont également été modélisés à l'aide de DOE-2E.

Les cédules d'occupation des locaux ont été programmées en fonction de l'horaire des activités académiques. Pour les locaux ayant d'autres vocations, un relevé a été fait sur place afin de connaître le nombre d'occupants, le type d'activités et l'horaire d'occupation. Les cédules d'opération de l'éclairage ont été déterminées à l'aide des cédules d'occupation des locaux et de la cédule de fermeture de l'éclairage de la commande centralisée du bâtiment. La puissance et le type d'éclairage des zones ont, quant à eux, été évalués en fonction des plans électriques de l'édifice. Les puissances d'équipements ont été évaluées de façon sommaire. Toutes les salles de cours sont équipées d'un projecteur vidéo, d'un projecteur acétates et d'un ordinateur. Seul l'ordinateur a été considéré, car c'est le seul équipement qui demeure allumé en tout temps, les autres étant utilisés de façon ponctuelle. Pour les autres locaux, un relevé d'équipements a dû être fait. À l'aide des informations données par les occupants, les horaires d'opération des équipements relevés ont pu être établis.

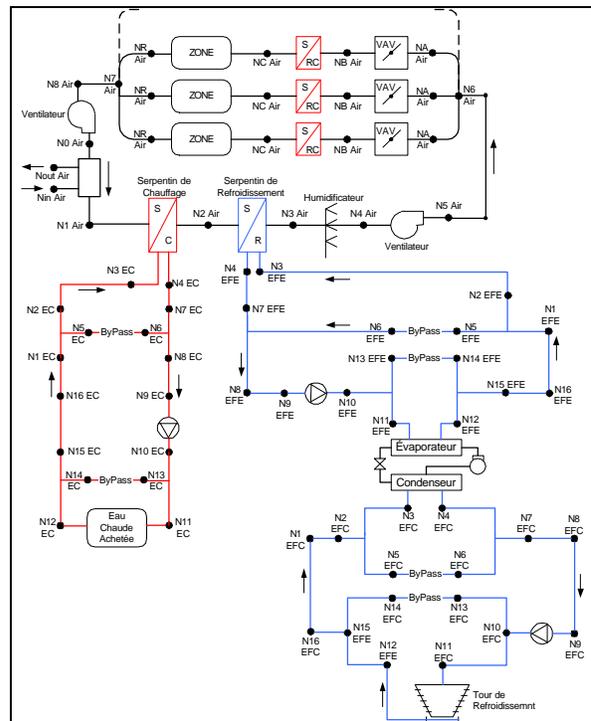


Figure 1. Schéma du système secondaire UTA-6 et du système primaire.

VALIDATION DU MODÈLE ENERGYPLUS

La validation, présentée ci-dessous, consiste en la comparaison des résultats obtenus par le logiciel EnergyPlus avec une base de données préenregistrées. La comparaison a été réalisée à deux niveaux (locaux desservis et système VAV). Les paramètres, comparés

au niveau des locaux desservis par le système VAV, sont la température ambiante, le débit d'air soufflé et la température de soufflage. Au niveau du système, seul le débit du ventilateur a été utilisé pour les fins de la comparaison. Le but de cette validation est d'obtenir la variation semblable des paramètres mentionnés précédemment obtenus par la simulation et l'enregistrement. La consommation d'énergie mensuelle ou annuelle, habituellement utilisée dans les validations, n'a pas été prise en considération, car les données enregistrées n'ont pas permis d'isoler ces valeurs pour le système VAV étudié. Même si la base de données d'enregistrement contient beaucoup plus de paramètres, pour les fins de la validation du modèle, seuls les paramètres suivants ont été pris en considération :

- Au niveau des locaux présélectionnés :
La température ambiante, le débit d'air soufflé, la détection de l'occupation et la température extérieure.
- Au niveau du système :
La température d'alimentation, le débit du ventilateur, la demande de délestage et la température extérieure.

Le pas d'enregistrement de la base de données est de 1 minute. Pour effectuer la comparaison, le pas de temps de calcul d'EnergyPlus a été fixé à son minimum, soit 10 minutes. La température d'alimentation du système UTA-6 est contrôlée en fonction de la température extérieure et du débit du ventilateur. De plus, les gestionnaires du bâtiment, pour les fins de délestage, modifient les cédules de démarrage des systèmes primaires et secondaires du bâtiment ainsi que les différents points de consignes et séquences de contrôle (ex. : réduction de la vitesse de rotation des ventilateurs, arrêt du refroidisseur d'eau glacée, etc.).

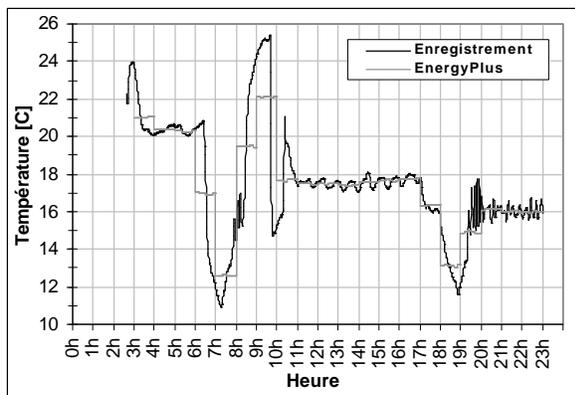


Figure 2. Variation de la température d'alimentation du système UTA-6 le 18 juin 2001.

Par exemple, on remarque sur la figure 2 que la température d'alimentation du système UTA-6 fluctue beaucoup. Celle-ci atteint 11.0°C à 7h19 et 25.4°C à 9h40. Étant donné que la variation de température est influencée par divers facteurs, une cédule la gérant a été introduite dans le logiciel EnergyPlus. Malheureusement, le pas de temps des cédules pouvant être définie dans EnergyPlus est de 1 heure. La cédule a donc été générée en calculant la température moyenne pour chaque heure d'enregistrement (voir figure 2).

Les figures 3 et 4 présentent respectivement la variation de la température ambiante et du débit volumétrique d'air soufflé dans le local 2304 obtenus par EnergyPlus et par le système d'acquisition de données. On peut constater une bonne concordance des courbes présentant les résultats de simulation et d'enregistrement. Il est à noter que les ajustements furent mineurs pour arriver à ces résultats grâce à un degré de véracité élevé des données relatives aux locaux étudiés.

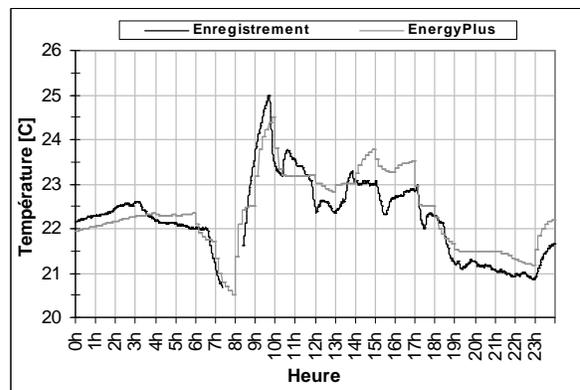


Figure 3. Variation de la température de la salle de cours 2304 le 18 juin 2001.

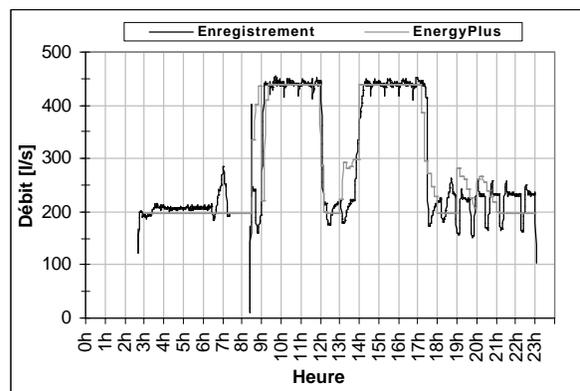


Figure 4. Variation du débit volumétrique d'air soufflé de la salle de cours 2304 le 18 juin 2001.

Cependant, en observant les figures 3 et 4, on note l'impact de la cédule de la température de soufflage, admise comme la moyenne horaire (mentionnée ci-dessus), sur l'allure des courbes obtenues par la simulation. Elle a pour effet d'augmenter ou de diminuer de façon tardive ou hâtive, par rapport aux données enregistrées, le débit de soufflage de la pièce ainsi que la température ambiante du local.

L'analyse des résultats de simulation de l'opération du système de ventilation ne fut pas si concluante que celle au niveau des locaux desservis. Le faible degré de véracité des informations recueillies pour les locaux aux vocations autres qu'académique ne permet pas de simuler l'ensemble du système avec précision. La validation de 4 zones du bâtiment avec succès nous permet de croire qu'avec un relevé détaillé accompagné d'un indice de véracité de l'ensemble des zones desservies par le système, il serait possible d'obtenir les résultats escomptés.

COMPARAISON ENTRE ENERGYPLUS ET DOE-2E

Afin de respecter les limites du logiciel DOE-2E et d'obtenir les mêmes conditions d'opération, le modèle de simulation fait sur EnergyPlus et validé dans l'étape précédente a été légèrement modifié et ajusté. À titre d'exemples :

- La température d'alimentation a été fixée à 16°C. Cette température représente la température d'alimentation moyenne enregistrée sur le système UTA-6 pour le mois de juin 2001.
- Les fractions radiatives de la chaleur sensible dégagée par les occupants et les équipements ont dû être adaptées aux conditions prédéfinies par le logiciel DOE-2E.
- Le choix de l'algorithme de calcul du coefficient de convection interne a également été modifié. Trois algorithmes de calculs du coefficient de convection interne sont disponibles dans EnergyPlus. On y retrouve un algorithme simplifié (coefficient fixe), un détaillé (coefficient variable en fonction de l'inclinaison de la paroi et de la différence de température entre la paroi et le fluide en contact avec celle-ci) et un dernier utilisant un modèle de convection mixte et forcé pour la diffusion de l'air par le plafond.

La figure 5 présente la variation de la température ambiante en fonction du type d'algorithme utilisé. On remarque que le choix de l'algorithme a une influence non-négligeable sur les conditions internes du local

2304, et ce, surtout lorsque le local est inoccupé. Il est à souligner que l'algorithme simplifié (le seul disponible dans DOE-2E) a été choisi pour fin de comparaison, tandis que lors de la validation du modèle, l'algorithme utilisant un modèle de convection mixte et forcé s'est avéré le plus performant des trois algorithmes mentionnés ci-dessus.

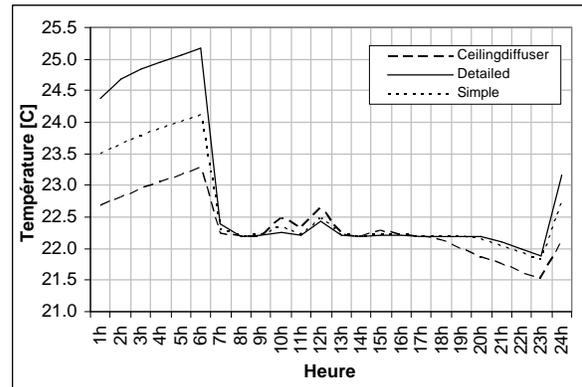


Figure 5. Influence du choix de l'algorithme de calcul du coefficient de convection interne sur la température ambiante du local 2304.

Les figures 6 et 7 présentent les variations des températures et des débits volumétriques d'air soufflé dans le local 2304 obtenus à l'aide d'EnergyPlus et du logiciel DOE-2E. L'analyse des résultats démontre que la différence de température absolue du local entre les deux simulations est en moyenne pour une semaine de 0.24°C. De plus, on remarque que les deux profils journaliers du débit volumétrique sont semblables. La différence absolue moyenne observée pour une semaine entre les débits obtenus à l'aide d'EnergyPlus et de DOE-2E est de 9%.

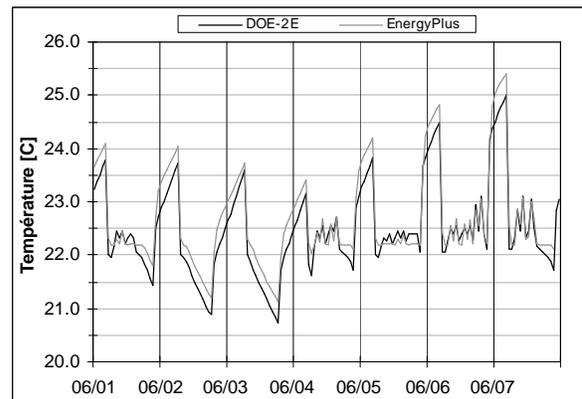


Figure 6. Répartition journalière de la température ambiante de la salle de cours 2304.

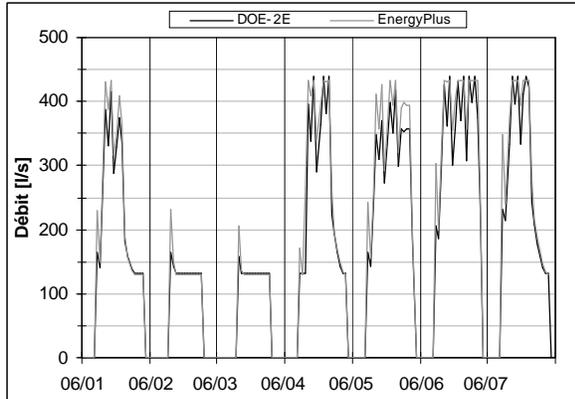


Figure 7. Répartition journalière du débit volumétrique d'air soufflé de la salle de cours 2304.

La principale différence observée porte sur le débit volumétrique d'air soufflé dans la zone lors du démarrage du système. En éliminant la première heure de fonctionnement du calcul de la moyenne, on remarque que l'erreur diminue de 2%. Cette différence lors du démarrage est encore plus visible sur les figures 8 et 9 où l'on présente respectivement la variation du débit volumétrique total du ventilateur et la variation de la demande de refroidissement du système UTA-6, et ce, pour les journées du lundi et du mardi.

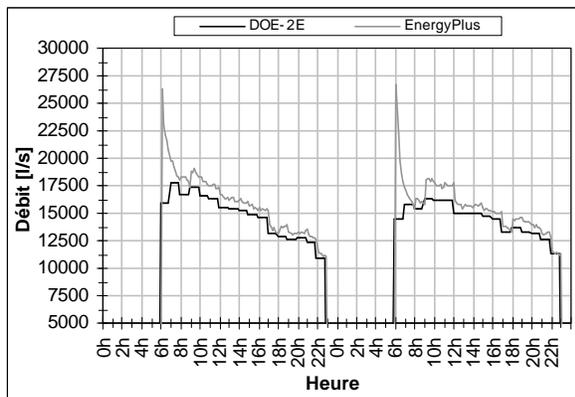


Figure 8. Répartition du débit volumétrique d'air du ventilateur du système UTA-6 pour les journées du lundi et mardi.

Les différences absolues entre les débits et les demandes de refroidissement des simulations sont respectivement de l'ordre de 8.5% et 8.3%. Comme précédemment, si on soustrait la première heure de fonctionnement des systèmes, l'écart entre les débits est plutôt de 5.7% et de 7.9% entre les demandes. Cette différence est partiellement due au pas de temps de 10 minutes utilisé avec EnergyPlus alors que le pas de temps de DOE-2E est de 1 heure.

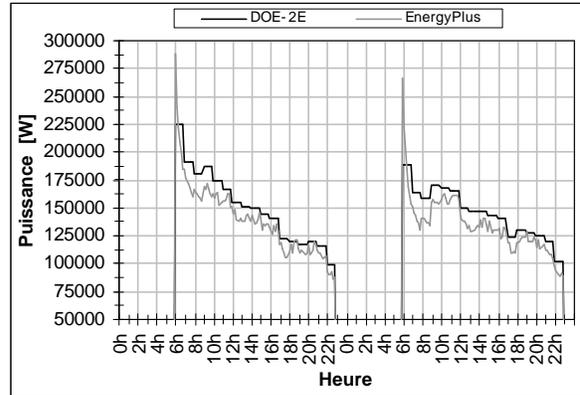


Figure 9. Répartition journalière de la demande de refroidissement au serpentin du système UTA-6 pour les journées du lundi et mardi.

Cependant, il est à noter que selon les données enregistrées sur le système UTA-6, le profil de la variation du débit du système ressemble davantage au profil obtenu à l'aide du logiciel EnergyPlus.

REMARQUES ET OBSERVATIONS

La présente section est un résumé des principales remarques et observations faites lors de la programmation du modèle dans EnergyPlus et de l'analyse des résultats obtenus. Le but n'est donc pas de faire la liste complète des particularités du logiciel et de ces anomalies, mais de présenter celles observées par notre équipe.

Remarques portant sur la modélisation et la simulation

- 1- L'une des premières observations faites porte sur la quantité de données et de lignes codes à introduire dans EnergyPlus versus DOE-2E. Par exemple, pour simuler le système UTA-6 et les zones qu'il alimente, environ 7500 lignes codes ont été introduites dans DOE-2 contre 22000 lignes codes dans EnergyPlus. Il est à noter, que lors de la modélisation des zones desservies par le système UTA-6, l'ensemble des partitions internes ont été simulées dans les deux logiciels. Dans le logiciel EnergyPlus, une partition interne doit être définie dans les 2 zones contrairement à DOE-2E où l'on doit définir la partition seulement dans une des deux zones. Cette différence augmente ici considérablement le nombre de lignes codes dans EnergyPlus.
- 2- La définition, dans EnergyPlus, d'une paroi (mur, toiture, plancher, fenêtre ou partition) impose l'introduction des coordonnées cartésiennes (x,y,z) de chaque extrémité de celle-ci comparativement à DOE-2E où il est possible d'introduire seulement la superficie, l'inclinaison et l'orientation de la

paroi. Par contre, l'introduction des coordonnées cartésiennes, grâce à un fichier *.dxf* créé par EnergyPlus, permet de visualiser les parois décrites dans celui-ci.

- 3- Les outils de conversion du code DOE-2 et des fichiers météorologiques ont été testés avec succès. Le premier outil permet de convertir la section LOAD du code DOE-2 incluant l'ensemble des horaires qui doivent être décrits de façon non-abrégée. Par la suite, l'utilisateur doit inclure les informations manquantes et requises par le logiciel EnergyPlus qui ne les sont pas avec DOE-2. Le second outil permet quant à lui de convertir les fichiers météo standard (ex. WYEC2) en fichier de type *.ewp*, utilisé par EnergyPlus.
- 4- Les différentes possibilités d'agencement des éléments d'un système rendent l'utilisation de ce logiciel intéressante lors de la simulation de systèmes dits non-conventionnels.
- 5- La possibilité d'effectuer le transfert de l'air d'une zone à une autre permet de simuler les conditions ambiantes d'une zone climatisée de façon indirecte. Cette option a été testée avec succès sur les salles de toilettes qui étaient climatisées de façon indirecte par les corridors du 2^{ème} étage.
- 6- La possibilité de contrôler deux systèmes de traitement de l'air permet, par exemple, de modéliser une unité de climatisation de fenêtre avec un système central de traitement de l'air. La séquence de contrôle de ces unités est alors déterminée à partir des priorités en mode chauffage et refroidissement fixées par l'utilisateur.
- 7- Les simulations ont été lancées sur un ordinateur muni d'un processeur AMD Athlon XP de 1000 Mhz et de 768 Meg. de mémoire vive. Pour la simulation d'un mois, avec un pas de temps de calcul de 10 minutes, le temps de calcul sur cet ordinateur était de 14 minutes sous EnergyPlus comparativement à quelques secondes avec DOE-2 (Pas de temps = 1h).
- 8- La réduction du pas de temps de calculs permet d'évaluer de façon plus précise l'impact des variations importantes et subites de certains paramètres d'opération et/ou de fonctionnement des systèmes et des zones qu'il alimente. Cependant, les cédules sont de type horaire ce qui réduit la précision des résultats obtenus. En observant les figures 10 et 11, on remarque l'influence du choix du pas de temps sur les demandes de refroidissement et de débit d'air du système de traitement de l'air UTA-6. Ainsi, on peut constater que la réduction du pas de temps, permet de mieux évaluer la dynamique du bâtiment étudié.

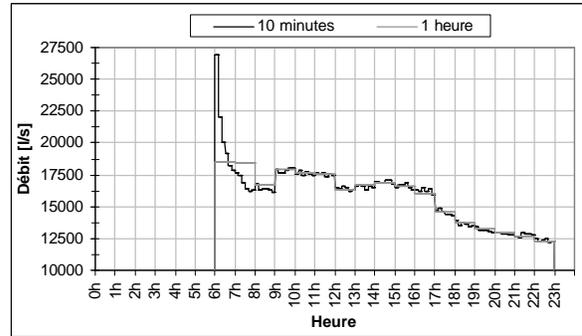


Figure 10. Variation du débit volumétrique d'air du système UTA-6 en fonction du pas de temps.

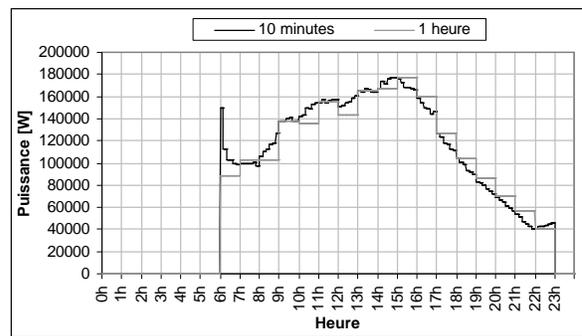


Figure 11. Variation de la demande de refroidissement du système UTA-6 en fonction du pas de temps.

- 9- Le point de lecture du contrôleur de l'humidificateur ne peut être fait que par la lecture de l'humidité d'une zone et non d'un nœud du système de traitement de l'air (ex. : le retour d'air).
- 10- L'utilisation d'un même nœud de lecture pour contrôler deux serpentins, soit un serpentin de chauffage et un serpentin de refroidissement, occasionne des erreurs dans la simulation (un des deux serpentins ne fonctionnera pas).
- 11- L'ordre d'apparition des serpentins dicte l'ordre et l'emplacement des sondes de température (points de lecture). Par exemple, le point de lecture du contrôle de la température d'alimentation en mode refroidissement doit absolument être situé directement à la sortie du serpentin de refroidissement.

Anomalies rencontrées

- 1- Une perte de débit massique a été observée entre certains nœuds des systèmes CVCA. La provenance de ces pertes de débit n'a pu être décelée. Pour une journée type, la perte maximale observée a été de 0.20181kg/s, soit 0.83% du débit total. Il est à noter que la quantité d'air perdue varie en fonction du temps.

2- Lors de la simulation, le débit maximum du ventilateur d'alimentation du système VAV n'était pas respecté. Ainsi, lorsque la demande au ventilateur central augmentait et dépassait la capacité du ventilateur, le logiciel augmentait malgré tout le débit d'air pour répondre aux besoins de chacune des zones. Le débit volumétrique nominal du ventilateur d'alimentation était de 23000l/s et la somme des débits des boîtes à volume d'air variable était de 27060l/s. Ainsi, le facteur de diversité du système (85%) n'était pas respecté.

CONCLUSION

L'analyse comparative du logiciel EnergyPlus a permis de démontrer la fiabilité des résultats obtenus et la performance des algorithmes de calculs utilisés par celui-ci. La force du logiciel EnergyPlus est, entre autres, de permettre à l'utilisateur de simuler toutes sortes d'arrangements de systèmes et d'avoir le contrôle sur presque tous les paramètres de la simulation, tels les fractions radiatives et convectives des charges internes, le pas de temps de calculs, etc. Comme il a été démontré pour le démarrage du système, le pas de temps de calculs permet de mieux simuler certaines opérations des systèmes CVCA.

Lors de l'analyse des résultats obtenus avec DOE-2E et EnergyPlus, certaines différences ont été observées entre ceux-ci. Ces différences étaient principalement dues au manque de flexibilité du logiciel DOE-2. Par exemple, l'algorithme de calcul du coefficient de convection interne utilisé par défaut dans le logiciel DOE-2 peut être choisi selon la complexité de calculs dans le logiciel EnergyPlus. Il a été démontré que le choix de cet algorithme avait une influence non-négligeable sur la variation de la température ambiante des zones, et ce, surtout lorsque le système CVCA était en arrêt.

BIBLIOGRAPHIE

Witte M.J., Henninger R.H., Glazer J. (2001), *Testing and validation of a new building energy simulation program*, Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brésil.

Crawley D.B., Winkelmann F.C., Lawrie L.K. Pedersen C.O. (2001), *EnergyPlus: New capabilities in a whole-building energy simulation program*, Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brésil.

Henninger R.H., Witte M.J. (2001), *EnergyPlus Testing with HVAC BESTEST*, The Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

Henninger R.H. and Witte M.J. (2001), *EnergyPlus Testing with ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 (BESTEST)*, The Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

Input Output Reference – The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, The Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Juin 2001.

EnergyPlus Engineering Document – The reference to EnergyPlus Calculations, The Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Juin 2001.

DOE-2 Engineers Manual, Lawrence Berkeley Laboratory and Los Alamos National Laboratory, November 1982.